

## トウモロコシのデンプン抽出性—産地の異なるトウモロコシ

アメリカ穀物協会では、米国のトウモロコシが工業用デンプン製造の際に他の産地のトウモロコシよりも高いデンプン収量を与えることを実証する研究プロジェクトの中間報告結果を発表しました。デンプン収量を高めることによって、米国の平均的なデンプン製造工場の規模で年間数百万ドル(数億円)単位の収入増が見込まれ、工業用デンプンプラント全体の収益性を向上させると期待されます。米国産トウモロコシは「抽出性」デンプンのレベルが高いことから、収益性の向上に直接つながるだけでなく、米国産トウモロコシの処理時間が他の産地の半分であり、同じ時間内に、米国産トウモロコシは他の産地のトウモロコシの2倍量が処理できることもわかりました。このことは、工場全体で見た場合には、年間スループット向上の可能性を示唆しています。さらに、米国産トウモロコシはその品質の一貫性と均一性から、他の産地よりも操業中の調節の必要性が少ないことが知られています。これらはすべて、米国産のトウモロコシの優位性を支持するものです。

イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校にある統合バイオプロセスング研究所のエグゼクティブディレクターであるビジェイ・シン(Vijay Singh)博士は、アメリカ穀物協会の依頼でその優位性を実証する研究を実施しました。過去2年間にわたり、米国、アルゼンチン、ブラジル、ウクライナ、セルビア、インドネシア、インドからのトウモロコシサンプルが、アジア、ラテンアメリカ、インド、地中海にある6つの工業用デンプン加工業者の倉庫から採集されました。それらのサンプルは分析のためにイリノイ大学に送られ、試験に用いられました。その結果、米国のトウモロコシが他の産地のものよりも抽出性デンプンが2~4%高いことを示しました。米国産トウモロコシにおいて高いデンプン抽出性が示される理由の一つとして考えられるのは、米国で生産される、「ミリング能力」に影響を与える優れた形質(遺伝的性質)を持つハイブリッドトウモロコシ品種です。この優れたミリング能力のおかげで、南米のより硬い胚乳を持つハイブリッドよりも容易にデンプンを抽出することが可能になっています。図1は、米国産と他の産地の2021年産トウモロコシのデンプン抽出性を比較したものです。米国産の収率の良さを示しています。

通常、バイヤーは米国産トウモロコシの破損トウモロコシと異物(BCFM)レベルに焦点を当てていますが、この研究では、BCFM

レベルを考慮しても、米国産トウモロコシが他の産地のものより総合的に優れ、実際にプラントでの全体的な収益性が向上することが示されました。加工工場のパフォーマンスの最適化のために、米国産トウモロコシの利用が貢献します。これらの結果は、この研究が対象としたプラントだけでなく、世界中のデンプン製造の原料としてトウモロコシを利用しているすべての商業用プラントに適用されます。先に述べた通り、1日あたり2,540メートルトン(100,000ブッシェル)のトウモロコシ処理能力を持つ湿式ミリング工場では、米国産トウモロコシを利用することによって、年間約650万ドルから900万ドルの追加収益が期待できます。さらに、米国のトウモロコシに必要な処理時間が他の産地と比較して短縮されることにより、プラントの生産能力が向上することによって、さらに増加する可能性があります。

この研究は2019年から2021年まで、過去3年間の米国産トウモロコシと他の産地のトウモロコシのミリング能力を比較し、今後も引き続き調査する予定です。今回は、調査初年度の2019年産のトウモロコシについて比較した結果をまとめた科学論文のまとめを報告します。この報告の原著は「Bhatia G, Juneja A, Bekal S, Singh V. Wet milling characteristics of export commodity corn originating from different international geographical locations. Cereal Chem. 2021;00:1-8. <https://doi.org/10.1002/cche.10423>」をご参照ください。

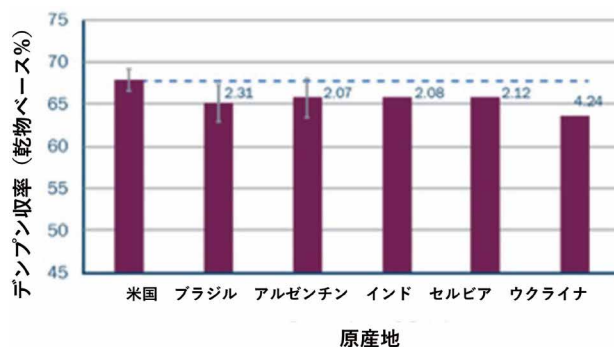


図1 2021年産トウモロコシでの結果—米国産と他産地のトウモロコシ間の抽出デンプンの収率比較

## 世界の様々な地域で生産される輸出用トウモロコシのウェットミリング特性

**概要:**軟胚乳トウモロコシはウェットミリングに向く特性を有するが、輸送中に破損や破砕が起りやすい。本研究では、世界の様々な地域で生産される胚乳硬度の異なるトウモロコシの粉碎性、およびウェットミリングがトウモロコシ輸入業者に及ぼす経済的影響について比較した。概して、米国産トウモロコシは南米産トウモロコシとの比較で胚乳が柔らかく、破損粒&異物の割合は0.4~3.4%で同じ国に輸出された他のトウモロコシの値よりも高い。世界各地の市場へと輸出された米国産トウモロコシのデンプン収率は同じ市場に輸

出された南米産トウモロコシの値を4~5%上回っている。これは1日当たり2,540MT生産するウェットミリング・プラントに年間6.5~9百万USDの追加収入をもたらすことを意味する。しかし、破損率が高いにもかかわらず、米国産トウモロコシは他の地域のトウモロコシと比較して優れた粉碎性と高いデンプン収率を有し、その結果としてトウモロコシのウェットミリング・プラントの収益性に改善をもたらす。

はじめに:トウモロコシのウェットミリングのプロセスには、コーングルテ

ン飼料、コーングルテンミール、胚芽というような併産物だけでなく、デンプン、精製グルコースとデキストロース、高果糖コーンシロップのように価値の高い産物の成分を抽出するためにトウモロコシ穀粒を分画化する工程が含まれる。デンプンは最も主要な産物で、甘味料、燃料用アルコール等の製品材料に用いられる。2019年、米国で生産された合計3億6,000万メートルトンのトウモロコシのうち、約2,923万トンのトウモロコシがウェットミリング処理され食品および産業用途として用いられた。

2018~2019年に米国は価格にして95億8,000万USDドル、5,250万トンのトウモロコシをメキシコ、日本、コロンビア、台湾といった国々に輸出したが、こうしたトウモロコシの一部はウェットミリングに用いられている。デンプン収率はこうしたトウモロコシのエンドユーザーの利益に貢献する主要なファクターである。しかしながら、ウェットミリング業者は輸入のための輸送時の破損粒&異物混入(BCFM%)を懸念する。長距離輸送においては混合、保管、荷積み、荷卸し、積み替えといった数回の取り扱いの過程が存在し、こうした過程がトウモロコシ品質変化の原因となる。こうした変化はエンドユーザーだけでなく穀物取扱業者にも経済的損失という結果をもたらす。

多様な栽培地域、気象条件およびトウモロコシの遺伝的品種は、様々な国際市場に向けて生産されるトウモロコシの物理特性や胚乳硬度に影響を及ぼす主要ファクターである。トウモロコシの胚乳の硬さはデンプン抽出のし易さとともに品質の指標にもなっている。胚乳の硬さは胚乳の構造、組成、顆粒成分の構造およびタンパク質分布に関係する。硬胚乳トウモロコシは軟胚乳トウモロコシを上回る(3.3倍)ゼインタンパク質を含有しているが、軟胚乳トウモロコシは貯蔵タンパク質(プロラミン+グルテリン)よりも生理活性の強いタンパク質(アルブミン+グロブリン)をより多く含有していることが知られている。硬度が増すと保管、取り扱いおよび輸送に望ましい品質となる一方で、デンプンの抽出性には悪影響を及ぼす。

米国産トウモロコシは半世紀以上にわたり、より高いデンプン収率を目指して育種されてきたため、総じて米国産トウモロコシの胚乳は南米のトウモロコシのものより柔らかい。米国中西部は気候の関係で収穫期間が短い。そのためトウモロコシの収穫時水分含量は通常13%(安全な長期間保管に求められる水分含量)を上回る。適切なデンプン回収を達成するだけでなく、トウモロコシの保存と輸出を考慮して収穫後に人工的な乾燥が必要とされるが、これがストレスクラックに結びつく。概して胚乳の柔らかい米国産トウモロコシは運搬中や海外市場への輸送中にストレスクラックを原因とする破損が起りやすい。一方、南米産(ブラジルとアルゼンチン)のトウモロコシは概して胚乳が硬く、収穫前に圃場で乾燥させて水分含量を下げている。穏やかで自然な乾燥であるため、ストレスクラックを招かない。

破損トウモロコシや埃はウェットミリング業者にとってクリーニングや輸送に関わる問題を引き起こす原因となるため、それらの少ないトウモロコシを好む。一方で、ウェットミリングプロセスの経済性はウェットミルのデンプン収率、即ちトウモロコシのウェットミリング特性に大きく依存する。デンプン収率が1パーセント増加すると、トウモロコシのウェットミリング・プラントの追加収入は1年間で相当額にのぼる可能性がある。

収穫後に実施する作業や穀物の成熟度だけでなく、トウモロコシの遺伝形質、気象パターンや立地といった地理的ファクターも物理特性に影響をおよぼすことが知られているが、これらはトウモロコシのウェットミリング特性、即ち粉碎性、主としてウェットミリング収率にも影響を及ぼす。ウェットミリングで処理するトウモロコシは何よりもウェットミリング収率、特にデンプン収率に基づいて選択すべきであり、物理特性のみに基づいて選択すべきではない。

## 材料と方法

**試料トウモロコシとその分析:**2018年産のアルゼンチン産、ブラジル産および米国産のトウモロコシのサンプル(写真1)をコロンビア、台湾およびチュニジアの到着港ターミナルで入手した。一隻の輸送船から目的地であるデンプン工場に到着した3台のトラックからサンプルを抽出し、各サンプル別に5ガロンのプラスチック製バケツの中で混合した。サンプルはイリノイ大学へ輸送された後、化学組成、BCFM、水分含量、容積重および硬度の分析を行った。

**ウェットミリング:**トウモロコシのサンプルはデンプン、タンパク質、胚芽繊維と可溶性物質に分画し、ラボスケール100gウェットミリングを実施した。ウェットミリングによる分画収率は、乾物ベースの全トウモロコシに対する各分画の乾燥重量の割合(%)で報告した。この手順、またタンパク質抽出法については、原著を参照されたい。



写真1 サンプルトウモロコシ

## 結果と考察

**ウェットミリングデンプン収率:**トウモロコシのデンプンの収率はエンドユーザーおよびウェットミリング用トウモロコシ輸入業者にとって考慮すべき最も重要なファクターである。100gのウェットミリングのラボ試験では、米国産トウモロコシサンプルのデンプン収率(68~70% w/w)は南米産トウモロコシの値(64~66% w/w)を有意に上回った(図2)。各トウモロコシサンプルの粉碎性は一律ではなく、遺伝形質、農業条件および収穫後作業に左右され、その結果としてデンプン含有率が似通っているにも関わらず、ウェットミリングで得られるデンプン収率にばらつきが発生した。こうした結果は、米国から輸出される軟胚乳トウモロコシの粉碎性が高いことを示唆している。

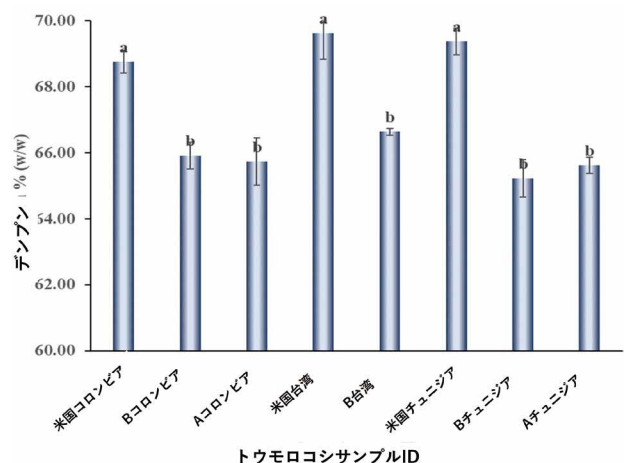


図2 ウェットミリングで処理したトウモロコシのデンプン収率を比較a,b. ウェットミリングしたトウモロコシの総質量100グラムの最小有意差 $p \leq 5. \% (w/w)$ 。米国、B、Aトウモロコシとはそれぞれ米国、ブラジルおよびアルゼンチンから輸出先の各国に輸出されたトウモロコシである。

**トウモロコシサンプルの物理特性:**フローテーションインデックスは穀粒密度の指標であり、よって胚乳硬度の指標となる。米国産トウモロコシのサンプルすべてのフローテーションインデックスの値が南米産

表1 トウモロコシの物理的性質

輸出国： 輸入国：	米国 コロンビア	ブラジル コロンビア	アルゼンチン コロンビア	米国 台湾	ブラジル 台湾	米国 チュニジア	ブラジル チュニジア	アルゼンチン チュニジア
フローテーション インデックス	80.00 ± 1.41	49.67 ± 2.49	47.33 ± 4.11	81.67 ± 2.87	58.33 ± 2.05	80.00 ± 1.7	49.67 ± 1.41	47.33 ± 5.31
BCFM (%)	0.4	1.4	0.8	3.4	0.6	1.6	1.4	1.1
容積重 (ポンド/bu)	58.44 ± 0.47	61.20 ± 0.41	60.45 ± 0.42	56.09 ± 0.28	60.62 ± 0.32	58.94 ± 0.41	59.38 ± 0.30	60.05 ± 0.13



ブラジル 67%      米国 91%      アルゼンチン 78.6%  
写真2 フローティング試験

トウモロコシの値を上回り、胚乳の硬さに差のあることを示唆している(写真2、表1)。この値は胚乳の柔らかさと正相関する穀粒の破損し易さを見極める上で役立つ。よって、米国産トウモロコシは破損し易いが、記録されたサンプルのBCFM%からもそのことが確認できる。高温での人工乾燥もフローターの数を増やす要因となっている。3か国が輸入した米国産トウモロコシのBCFMはいずれも0.4~3.4の範囲で、それぞれ同じ国が米国以外から輸入したトウモロコシサンプルの値を上回っている。これら最終使用国(コロンビア、台湾、チュニジア)すべてにおいては米国産トウモロコシの容積重も低く、サンプルが高温で人工的に乾燥されたものであることが示唆されている。容積重は穀粒密度の指標でもあり、水分含量、形状、BCFM、人工乾燥、取り扱い等のファクターも梱包やトウモロコシ1ブッセル当たりの重量に影響を及ぼす。

デンプン収率と比較して観察されたトウモロコシの物理特性では、米国産トウモロコシは穀粒密度が低く、ストレスクラックや破損が発生し易い一方で、南米産トウモロコシよりもデンプン収率が高いという明確な傾向を示している。米国産トウモロコシは南米産トウモロコシよりも胚乳が柔らかいことが示されたため、胚乳の硬さはトウモロコシの粉碎性と負の相関関係にあると結論付けることができる。

**化学組成分析:** ウェットミリングのデンプン収率の差がデンプン含有率の差に基づくものか否かを見極めるため、すべてのトウモロコシのサンプルの化学組成分析を実施し、すべてのトウモロコシのサンプルの化学組成は似通っていることが示された。ウェットミリングにより抽出される主要産物であるデンプンの含有率は、輸出先や生産国の違いに関わらず、すべてのトウモロコシサンプルで約72%であった。このため、トウモロコシの化学組成はウェットミリングでの収率を見積もる手助けとなるファクターであるとは考えられない。トウモロコシの化学組成に識別可能な差がないため、トウモロコシを輸入する際には物理的外観に基づいてサンプルを選択する傾向がある。化学組成の詳細については原著を参照されたい。

**タンパク質分画の分析:** 米国産トウモロコシの胚乳は柔らかく、デンプン収率が高い。主要4種のタンパク質分画(アルブミン、グロブリン、プロラミン、グルテリン)をすべてのサンプルから別々に抽出し、回収したすべてのタンパク質の重量を測定した(表2)。トウモロコシのタンパク質の組成と分布は胚乳の硬さや物理特性に影響を及ぼす。アルコール可溶性のゼインタンパク質(プロラミン)は、軟胚乳トウモ

ロコシとの比較で、硬胚乳トウモロコシに含まれるより大型でより豊富なタンパク粒中に存在する。トウモロコシのタンパク質マトリクスは緊密に結びついているデンプンのマトリクスと密接な関係があり、デンプンの遊離と回収に、ひいては粉碎性に影響を及ぼす。塩基可溶性のグルテリンタンパク質はジスフィド結合の開裂があつて初めて抽出が可能となるが、このことはこうした結合によって相互に結びついた三次元ネットワークとしてトウモロコシ胚乳内に存在していることを示しており、これは明確に識別できるひとつのタンパク質のシステムである。本試験ではサンプル中の生理活性タンパク質や貯蔵タンパク質の顕著な傾向は認められなかった。トウモロコシは複数の異なる品種のトウモロコシを混合したものであり、トウモロコシのタンパク質分画についての観察データは、胚乳の硬さとタンパク質含有率が相関するとした、同質遺伝子ハイブリッドによる過去の試験とは一致していない。

表2 トウモロコシのたんぱく質画分

サンプル	生理的有効タンパク質含量 (グラム)	貯蔵タンパク質含量 (グラム)
米国コロンビア	0.33 ± 0.016	0.35 ± 0.008
Bコロンビア	0.32 ± 0.011	0.32 ± 0.004
Aコロンビア	0.36 ± 0.028	0.40 ± 0.013
米国台湾	0.33 ± 0.005	0.39 ± 0.037
B台湾	0.37 ± 0.004	0.34 ± 0.002
米国チュニジア	0.36 ± 0.008	0.36 ± 0.023
Bチュニジア	0.41 ± 0.066	0.37 ± 0.022
Aチュニジア	0.30 ± 0.021	0.41 ± 0.030

タンパク質含量は粉碎トウモロコシ5グラムから抽出されたグラム数。生理的有効タンパク質は、水と食塩水にそれぞれ抽出されたアルブミンとグロブリンで、貯蔵タンパク質はエタノールと水酸化ナトリウム溶液にそれぞれ抽出されたプロラミンとグルテリン。米国、B、Aトウモロコシとはそれぞれ米国、ブラジルおよびアルゼンチンから輸出先の各国に輸出されたトウモロコシである。

**ウェットミリングの分画収率:** 胚芽、グルテン、繊維および浸漬液といったウェットミリング試験から得られたその他の成分の収率(図3と4)も記録した。いずれのウェットミリング試験でも固形分の総回収率は約99%が確認された。グルテンに含まれるタンパク質を回収し、胚芽に含まれる油分も推測して比較した。回収率の記録値は以前に実施された100gスケールの試験所ウェットミリング試験の値に近かった。

回収した胚芽は粉碎し、油分含有率を分析したが、いずれの3か国の輸入トウモロコシサンプルでも常に乾物ベース重量で約50%を示した。胚芽は回収された総固形分の約5~6%を占めた。胚芽の回収率はコロンビアとチュニジアに輸出された米国産トウモロコシで高く、台湾に輸出されたトウモロコシと同程度であった。以前の試験では、硬胚乳トウモロコシよりも軟胚乳トウモロコシのウェットミリングから得られた胚芽回収率の方が高い値を示した。

回収されたグルテンはウェットミリングを行った全トウモロコシの約

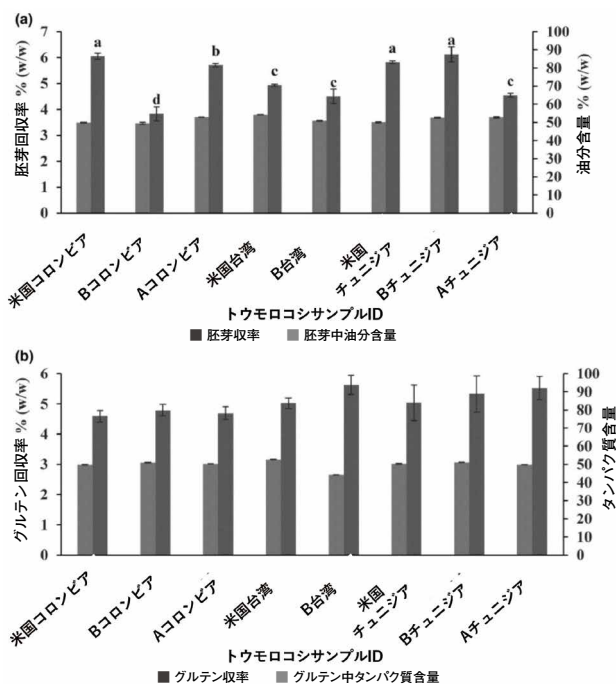


図3 (a) ウェットミリング処理した胚芽の回収率と油分含有率の比較および (b) ウェットミリング処理したグルテン回収率とタンパク質含有率の比較 a, b, c, d. ウェットミリング処理対象の総重量 100g のトウモロコシの最小有意差異  $p \leq 0.5\%$  (w/w)。米国、B、A トウモロコシとはそれぞれ米国、ブラジル、アルゼンチンから輸出先の各国に輸出されたトウモロコシである。

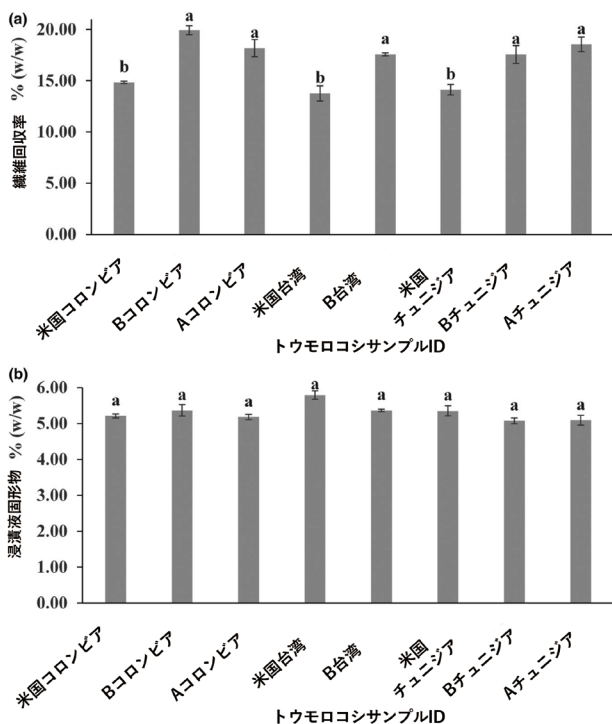


図4 (a) ウェットミリング処理した繊維の回収率の比較と (b) ウェットミリング浸漬液固形物回収率の比較 a, b. ウェットミリング処理対象の総重量 100g のトウモロコシの最小有意差異は  $p \leq 0.5\%$  (w/w)。米国、B、A トウモロコシとはそれぞれ米国、ブラジル、アルゼンチンから輸出先の各国に輸出されたトウモロコシである。

4.5~6% (w/w) であった。調査対象のトウモロコシサンプルのいずれでも、テープリング後の回収グルテン中のタンパク質含有率は乾物ベースで約50%となった。粗繊維と細繊維を合わせると回収物質の大部分を占め、その値は米国産トウモロコシ (13~15% w/w) が

南米サンプルの値 (18~20% w/w) を大幅に下回った。これは未回収デンプンに起因すると考えられ、粉碎性に劣る硬胚乳サンプルでは、繊維量で計測されるため、これが繊維分画の増加につながっている。

分離させた物質の残余部分は回収された浸漬液固形物で構成されていた。BCFMと浸漬液の特性に関して実施された過去の試験によれば、高温で乾燥させた軟胚乳トウモロコシはより多くの可溶性固形物とタンパク質を浸漬液に遊離させる可能性が高い。そのため、軟胚乳トウモロコシは硬胚乳トウモロコシよりもグルテン回収率が低くなると予測される。しかしながら、サンプルの違いによるグルテン回収率や浸漬液固形物の有意な差は観察されなかった。

### 経済的影響と価値提案

米国産トウモロコシはデンプン回収率が有意に高く、このことから南米産トウモロコシよりも粉碎性に優れるといえる。ウェットミリングにより抽出されるデンプンの回収率が1パーセント増加すると、製品の販売価格とプラントの生産能力にもよるが、経済的効果は1ブッシェル当たりおおよそ4~6セント (1メートルトン当たりおおよそ2ドル) になるものと考えられる。この増加は大規模なウェットミリング・プラントにとって膨大なものになる。年間330日稼働する日産100,000ブッシェル (約2,500メートルトン) のウェットミリング処理プラントではデンプン回収率が1パーセント増加すると収入は約165万ドル増加する。したがって、米国産トウモロコシサンプルのデンプン回収率 (68~70% w/w) が南米産トウモロコシの値 (64~66% w/w) を4~6%上回るため、原材料に米国産トウモロコシを用いるウェットミリング・プラントの1年あたりの追加収入額は6.5~9百万USDに及ぶことになる。経済的効果はウェットミリングやデンプン回収の効率にも左右される。デンプンから得られる収入が増加することから、分離処理のためにBCFMを除去するユニットの機能を追加することや、軟胚乳トウモロコシのサンプルの破損を最小限に抑えるために輸送中の取り扱いを改善することに合理性がもたらされる。米国産トウモロコシはウェットミリング用のトウモロコシを輸入する業者にとってより良い価値提案となる。

**結論:** 米国産トウモロコシはデンプン回収率が68~70パーセントと高いため、南米から輸入されるトウモロコシと比較した場合、ウェットミリング用トウモロコシ輸入業者にプラスの経済的影響が生じる。軟胚乳トウモロコシはウェットミリングプロセスでの回収が容易な粉状デンプンのおかげで、ウェットミリングに優れていることが明らかになっている。輸送時の破損率が高くなるという軟胚乳トウモロコシの物理的性質に起因する問題があるものの、ウェットミリングプロセスにより軟胚乳のトウモロコシからは抽出性の高いデンプンを取り出すことができる。

ネットワークに関するご意見、  
ご感想をお寄せ下さい。



〒105-0001 東京都港区虎ノ門1丁目2番20号  
第3虎の門電気ビル11階  
Tel: 03-6206-1041 Fax: 03-6205-4960  
E-mail: Japan@grains.org

本部ホームページ (英語) : <https://www.grains.org>  
日本事務所ホームページ (日本語) : <https://grainsjp.org/>